

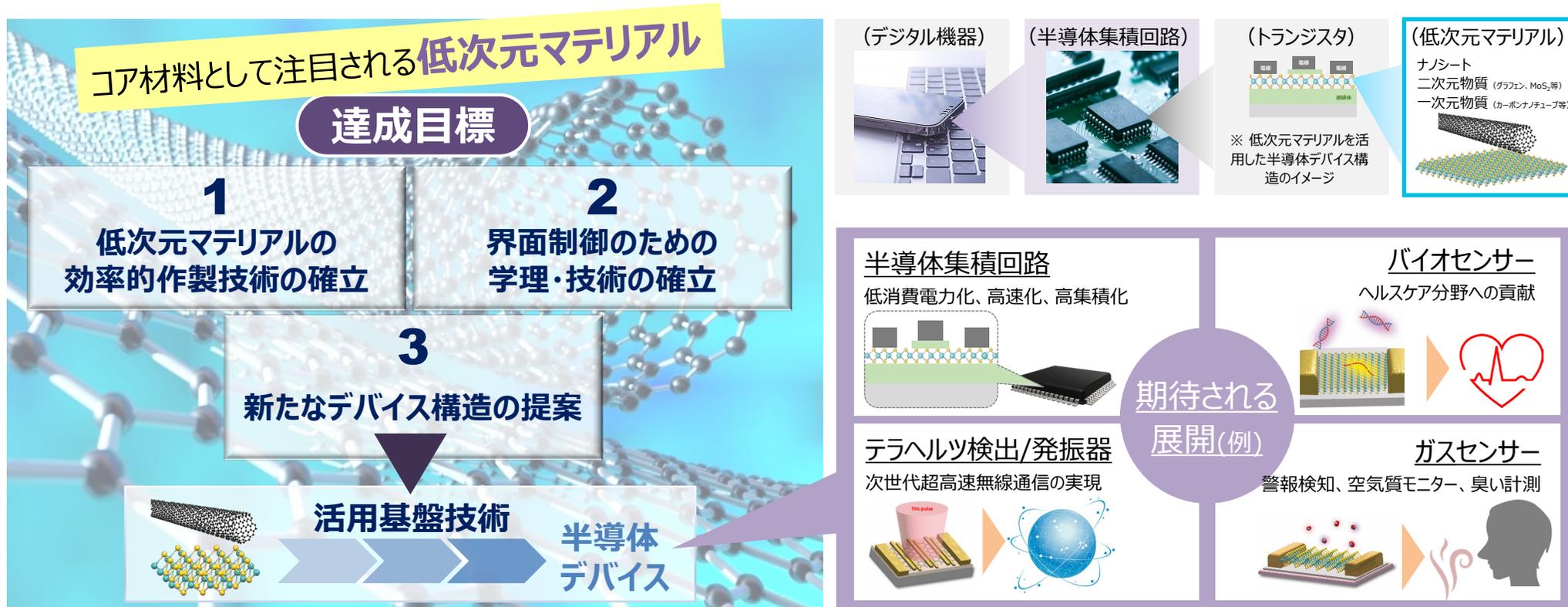


本戦略目標では低次元材料を新たな半導体デバイス構造に活用するための基盤技術の構築を目指す。

# 新たな半導体デバイス構造に向けた低次元材料の活用基盤技術

## 戦略目標趣旨

- デジタル社会の根幹を担う半導体集積回路のさらなる性能向上には、微細化・高集積化が求められるが、既に限界が迫っている。そのため、**新たなトランジスタ構造が必要**とされている。
- 新たなトランジスタ構造のコア材料として特異な電子構造を持つ**低次元材料が注目**されており、様々な半導体デバイスへの展開も期待できる。



## 将来像

半導体産業における我が国のプレゼンスを再び向上

実/仮想世界をつなぐ Society 5.0の実現に貢献

高度デジタル社会、安全・安心な社会、Well-beingが実現できる社会を達成

## 令和5年度戦略目標

### 1. 目標名

新たな半導体デバイス構造に向けた低次元マテリアルの活用基盤技術

### 2. 概要

デジタル社会の根幹を担う半導体集積回路には更なる低消費電力化・高速化・高集積化が求められ、そのために新たなトランジスタ構造が必要とされている。将来的には、極薄のナノシート、二次元物質、一次元物質といった低次元マテリアルがトランジスタのチャンネル材料として用いられることが期待されている。また、低次元マテリアルは、特異な電子構造を活用した新たな半導体デバイス（各種センサ、光デバイスなどの半導体素子）のコア材料として利用されることが期待されている。本戦略目標では、低次元マテリアルを新たな半導体デバイス構造に活用するために必要な基盤技術の確立を目指す。

### 3. 趣旨

ビッグデータ、人工知能、IoT などに関する技術やサービスが進展するなか、デジタル社会の根幹を担う半導体集積回路には更なる低消費電力化や高速化が求められている。半導体集積回路の低消費電力化・高速化はトランジスタ構造の微細化と高集積化により実現されるが、既に平面内での微細化には限界が迫っており、新たなトランジスタ構造が必要とされている。将来的に、極薄のナノシート、二次元物質（グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイドなど）、一次元物質（ナノチューブなど）といった低次元マテリアルがトランジスタのチャンネル材料として用いられることが期待され、世界的に研究開発が活発化してきている。また、低次元マテリアルは集積回路以外にも、特異な電子構造を活用した新たな光デバイス、テラヘルツデバイス、スピントロニクスデバイス、ガスセンサ、バイオセンサなどのコア材料として利用されることが期待され、それらデバイスの実用化が強く望まれている。国内でも、二次元物質をはじめとする低次元マテリアルの作製方法や新たな機能性の発現などに関する知識が蓄積されてきたが、今後は、新たな半導体デバイス構造の創製を目指し、低次元マテリアルを活用するための基盤技術の確立が必要がある。特に、日本の強みである材料に関する研究開発力や結晶成長・成膜に関する技術を活かして、良質な低次元マテリアルを効率的に作製する技術や低次元マテリアルと異種材料（基板材料・電極材料等）の界面を高度に制御するための学理や技術を構築することが非常に重要である。このような低次元マテリアルの活用基盤技術の確立することは、将来的に我が国の半導体産業基盤の強化に繋がる。このため、低次元マテリアルを新たな半導体デバイス構造に活用するための基盤技術にフォーカスした戦略目標の設定が重要かつ効果的である。

### 4. 達成目標

本戦略目標では、低次元マテリアルを新たな半導体デバイス構造に活用するために必要な基

盤技術の確立を目指す。具体的には、以下の達成を目指す。

(1) 高品質な低次元マテリアルを効率的に作製する技術の確立

新たな低次元マテリアルの開発に加え、高品質な低次元マテリアルを効率的に作製するための結晶成長・成膜・転写等のプロセス技術を発展させる。特に、新たな半導体デバイスを実現するためには低次元マテリアルの大面積化、欠陥濃度の制御、電子構造の制御、選択成長等が重要であるため、これらを具現化するための基盤技術を確立する。

(2) 低次元マテリアルと異種材料の界面を制御するための学理や技術の構築

低次元マテリアルを活用した半導体デバイスの特性は、低次元マテリアルと異種材料の界面の状態に大きく依存するため、界面制御に関する学理や基盤技術の構築が必須である。例えば、理想的なデバイス特性を得るためには、低次元マテリアルと基板の間に原子レベルの凹凸や欠陥の無い良質な界面を形成することや、低次元マテリアルと電極の間に低抵抗なオーミック接合を形成することが重要である。また、積層した二次元マテリアルでは界面を高度に制御することにより新たなデバイスの開発につながるような物性発現が期待できる。これらのような界面形成プロセス技術を発展させるとともに、界面に関する高精度な計測・解析技術、理論計算、モデル化、シミュレーションなどを通して、デバイス応用を前提とした界面設計・制御のための学理や技術を構築する。

(3) 低次元マテリアルを活用した新たなデバイス構造の提案

高性能デバイス、新機能デバイス、集積回路応用を目指して、低次元マテリアルの特徴を活かすような新たなデバイス構造を提案する。特に、低次元マテリアルと異種材料の界面に関する知見を最大限活かすとともに、製造プロセスにおける課題の明確化、デバイス特性の理解を通じて、実現可能なデバイス構造を設計することが重要である。

## 5. 見据えるべき将来の社会像

4. 「達成目標」の実現を通じ、低次元マテリアルを利用した超低消費電力かつ高速な集積回路を可能とし、実世界と仮想世界をシームレスにつなぐ Society 5.0 の実現に貢献する。特に我が国の強みである材料や結晶成長・成膜技術の分野で半導体産業におけるプレゼンスを再び向上させる。また、低次元マテリアルを用いた革新的デバイスは、センサネットワークにおいて必要なセンサ、通信、コンピューティングに利用される可能性があり、高度デジタル社会、安全・安心な社会、Well-being が実現できる社会に資するものである。

## 6. 参考

### 6-1. 国内外の研究動向

日本は材料の創製や機能に関する分野は伝統的に強く、低次元マテリアルに関連するこれまでの戦略目標の設定や科学研究費助成事業の新学術領域研究及び学術変革領域研究により、二次元物質の作製方法や新たな機能性の発現などに関する知識が蓄積されてきている。一方、国外では、特にロジック半導体の主要メーカーを中心に産業界での低次元マテリアルのデバイス

化に関する研究開発が強力である。

#### （国内動向）

平成 25～29 年度に科学研究費助成事業の新学術領域研究「原子層科学」によってグラフェンを中心とした単原子層物質の合成及び物性に関する基礎基盤研究が行われた。また、平成 26 年度の戦略目標「二次元機能性原子・分子薄膜による革新的部素材・デバイスの創製と応用展開」のもとに CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」が令和 3 年度まで行われた。ここでは 6 つの研究分野（界面、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド、トポロジカル材料、化学、生物）で研究開発が行われ、二次元材料の作製方法や新たな機能性の発現に関する基礎学理の構築が行われた。一方、トランジスタ動作実証レベルでの二次元材料の集積回路利用には多くの課題があることが同時に示された。令和 3 年度からは科学研究費助成事業の学術変革領域研究(A)「2.5 次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」にて二次元物質の積層による新物性や機能の探求が行われている。また、令和 2 年度から開始されている CREST「情報担体を活用した集積デバイス・システム」、さきがけ「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」でも二次元物質を新たなメモリ等へ活用する試みが行われている。

応用物理学会、日本物理学会、日本化学会、高分子学会などの学会でも二次元物質をはじめとする低次元材料に関するシンポジウムが数多く開催されており、低次元材料のデバイス化に関する研究開発は近年ますます活発化している。

#### （国外動向）

半導体集積回路は微細化の限界から三次元構造へと進化し、トランジスタレベルにおいても平面型の MOSFET からナノシート FET、相補型ナノシート FET へと進み、究極的には二次元物質がチャンネルに活用されることが半導体ロードマップ（IEEE International Roadmap for Devices and Systems : IRDS）にも記載されている。ロジック半導体の主要メーカーは、ナノシートや二次元物質を用いたトランジスタの開発研究を強力的に推進している。

低次元材料については、材料・化学・デバイス等の主要な国際学会でも大きなテーマとして扱われており、学术界においても極めて注目度の高い分野となっている。二次元物質のトランジスタ応用に関する論文数は 2010 年代から世界的に急増しており、日本以外では、中国、米国、韓国、インド、ドイツなどが強力的に研究を推進している。なお、日本は特に材料やテラヘルツ応用などの分野で存在感がある。

## 6-2. 検討の経緯

「戦略目標の策定の指針」（令和元年 7 月科学技術・学術審議会基礎研究振興部会決定）に基づき、以下のとおり検討を行った。

1. 科学研究費助成事業データベース等を用いた国内の研究動向に関する分析及び研究論文データベースの分析資料を基に、科学技術・学術政策研究所科学技術予測センターの専門家ネットワークに参画している専門家や科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）の各分野ユニット、日本医療研究開発機構（AMED）のプログラムディレクター等を対象として、注目すべき研究動向に関するアンケートを実施した。
2. 上記アンケートの結果及び CRDS 研究開発戦略検討会「低次元マテリアル活用基盤技術の創出」での有識者の話題提供や議論内容等を参考にして分析を進めた結果、半導体回路設計等に活用可能な高品質な低次元マテリアルの形成、低次元マテリアルと異種材料との間の界面の構造・物性の解明及び理論構築が重要であるとの認識を得て、注目すべき研究動向「次世代半導体応用に向けた低次元マテリアルヘテロ界面の制御」を特定した。
3. 令和 4 年 11 月に、文部科学省と JST は共催で、注目すべき研究動向「次世代半導体応用に向けた低次元マテリアルヘテロ界面の制御」に関係する産学の有識者が一堂に会するワークショップを開催し、低次元マテリアルを半導体デバイスに活用するための基盤技術構築の重要性、注目すべき国内・国外の動向、想定される研究内容・成果のイメージやそれらの学術的・社会的インパクトや波及効果等について議論を行い、ワークショップにおける議論やアンケート回答等を踏まえ、本戦略目標を作成した。

### 6-3. 閣議決定文書等における関係記載

「第 6 期科学技術・イノベーション基本計画」（令和 3 年 3 月 26 日閣議決定）

#### 第 2 章 Society 5.0 の実現に向けた科学技術・イノベーション政策

##### 1. 国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革

##### (1) サイバー空間とフィジカル空間の融合による新たな価値の創出

##### (c) 具体的な取組

##### ④ デジタル社会に対応した次世代インフラやデータ・AI 利活用技術の整備・研究開発

○国土全体に網の目のように張り巡らされた、省電力、高信頼、低遅延などの面でデータや AI の活用に適した次世代社会インフラを実現する。このため、5G/光ファイバの整備を進め、5G については、2023 年度末には 98%の地域をカバーし、光ファイバについては、2021 年度末には未整備世帯数が約 17 万世帯に減少すると見込まれる。さらに、宇宙システム（測位・通信・観測等）、地理空間（G 空間）情報、SINET、HPC（High-Performance Computing）を含む次世代コンピューティング技術のソフト・ハード面での開発・整備、量子技術、半導体、ポスト 5G や Beyond 5G の研究開発に取り組む。

##### (6) 様々な社会課題を解決するための研究開発・社会実装の推進と総合知の活用

##### (c) 具体的な取組

① 総合知を活用した未来社会像とエビデンスに基づく国家戦略の策定・推進

○デジタル社会を支える戦略的基盤技術である半導体について、経済安全保障への対応、デジタル革命や低消費電力化の推進を図るため、戦略を策定し、我が国の半導体産業基盤の強靱化に向けた国内外一体の各種対策を推進する。

「マテリアル革新力強化戦略」（令和3年4月27日統合イノベーション戦略推進会議決定）

第5章. アクションプラン

1. 革新的マテリアルの開発と迅速な社会実装

【目標】重要なマテリアル技術・実装領域での戦略的研究開発の推進

(2) 具体的な取組

- ✓ マテリアルが社会課題解決や産業競争力強化に資する重要な技術領域において、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や科学技術振興機構（JST）等を通じた、国内外・産学官の英知を結集したプロジェクトを推進
- ✓ 中長期的な観点から、基礎基盤研究・実装領域での戦略的研究を支援。競争的研究費改革や資金配分機関間の連携を適切に進め、戦略型研究と創発型研究の双方を充実
- ✓ サイエンスに基づくボトルネック課題のブレークスルーをもたらす新たな手法や技術シーズの創出、革新的マテリアルと既存技術の組み合わせによる飛躍的な性能向上、次世代スピントロニクス技術等の新たな原理・発想に基づく革新的技術の創出等、脱炭素化に向けた革新的技術シーズ創出のための研究開発を加速

「半導体・デジタル産業戦略」（令和3年6月経済産業省）

3. 個別戦略

(1) 半導体産業

<今後の対応策>

① 先端半導体製造技術の共同開発と生産能力確保

【主な取組】

(B) 半導体製造装置・材料等の先導研究

2020年代後半以降、次々世代の先端半導体製造に必要となる装置・材料等の先導的な研究開発や機微技術開発を支援する。

戦略的不可欠性を有する革新的材料を把握しつつ、先端半導体デバイスの前工程に用いられる材料（ナノシート等の半導体材料、配線材料、絶縁材料等）及び、先端半導体デバイスの後工程に用いられる部素材（封止材、バンプ材、三次元パッケージ基板等）、カーボンナノチューブを活用した次世代革新メモリに関する技術等を装置・製造メーカーとのすり合わせ等を通じて開発し、社会実装を実現する。

## 7. その他

本戦略目標を推進していくためには、これまで蓄積してきた低次元材料に関する取組やプロジェクトの知見を最大限に活かすことに加え、物性物理、理論科学、プロセス科学、データ科学、デバイス物理、シミュレーションなど多岐にわたる研究分野間の連携が必要である。また、低次元材料や基板の作製、計測・分析、シミュレーション、デバイスのプロトタイプを試作・検証が行えるような共通設備の整備や利用が重要であり、材料先端リサーチインフラ等で提供される先端設備を活用することが期待される。

本戦略目標においては多くの階層で研究開発が行われることが期待され、ボトムアップ型の基礎研究から、トップダウン型の目的基礎研究、応用研究まで切れ目のない研究開発支援が必要と考えられる。次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業とアカデミアの基礎研究の連携や、二次元物質の新物性や機能の探求及びデバイス化を目指した科学研究費助成事業の学術変革領域研究(A)「2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」、CREST「情報担体を活用した集積デバイス・システム」、さきがけ「情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム」との連携も積極的に進めていくべきである。

学会活動における低次元材料デバイス関係の新たなコミュニティ形成やデバイス開発のプロジェクトによるアカデミアと企業との連携や、日本の強みである材料、結晶成長・成膜、デバイスなどの技術を活かし、プロセス技術・集積化技術に強みを持つ海外の研究機関との連携強化を通して、先端半導体プロセスの知識と技術を獲得することも重要である。